



# 校园宇宙线观测暑期学校

感受国之重器，从宇宙线观测开始

7月23-24日 北京

主办单位

校园宇宙线观测联盟

支持单位



中国科学院高能物理研究所  
Institute of High Energy Physics  
Chinese Academy of Sciences

国科大关心下一代工作委员会



中国科学院大学教育基金会  
University of Chinese Academy of Sciences Education Foundation



国家高能物理科学数据中心  
National HEP Data Center





# 空气电离之谜—— 谁偷走了电荷？

CCOC2021



校园宇宙线暑期学校  
高能物理研究所

熊峥 刘佳



宇宙线，顾名思义，是来自宇宙的射线。

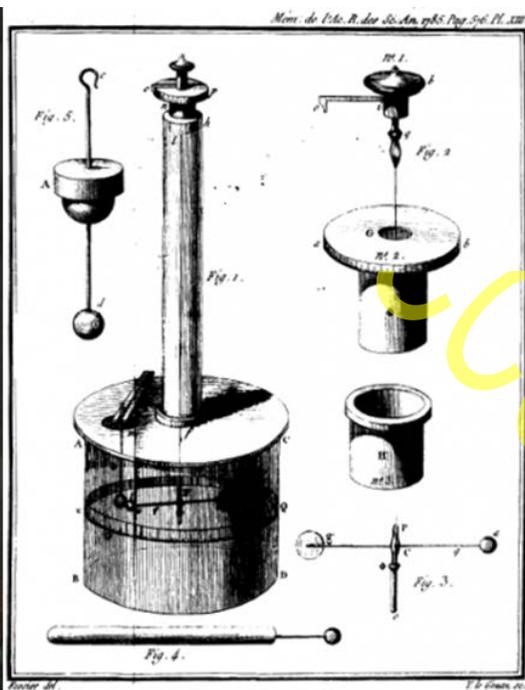
大家伸出手掌指向天空时，就有成百上千个来自宇宙的射线正悄无声息地穿过你的身体。

从记在报告中的一个不起眼现象到发现宇宙线，这个认知的历程却花费了人们近一个半世纪的时间。

这一切都要从库伦发现扭称会  
自发漏电开始说起



我的扭称总是在漏电，为什么啊，先记下来吧



612 MÉMOIRES DE L'ACADÉMIE ROYALE

## TROISIÈME MÉMOIRE SUR L'ÉLECTRICITÉ ET LE MAGNÉTISME.

*De la quantité d'Électricité qu'un corps isolé perd dans un temps donné, soit par le contact de l'air plus ou moins humide, soit le long des soutiens plus ou moins idio-électriques.*

Par M. COULOMB.

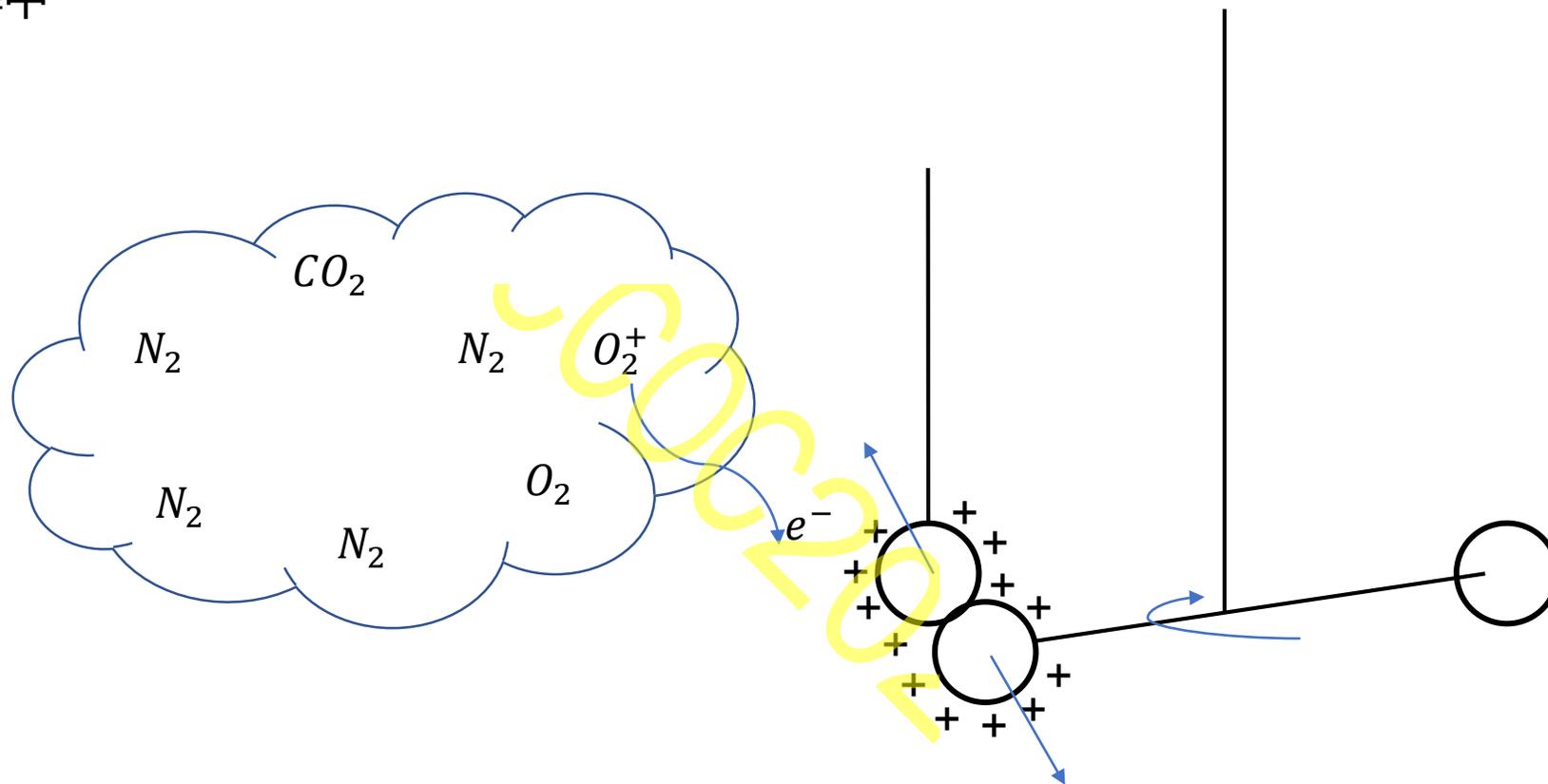
库仑(C. A. de Coulomb, 1736-1806,法国)和他基于验电器原理制作的扭力天平

1785年库仑提交给法国皇家科学院关于电与磁现象研究的报告中，记载了自己制作扭称的不能永久的保持电荷的情况。

通过改变小球的电荷量和悬丝扭转的距离，发现了库伦定律 $F \propto q_1 q_2 / r^2$

他更换了更绝缘的材料但仍然会漏电，最后他认为是空气电离带走了小球上的电荷。

## 在库仑的理解中



由于带有同种电荷，小球相互排斥，悬丝提供一个扭力与电磁斥力相互平衡。

空气中电离出来的负电中和了小球上的电荷，让扭称漏电了。

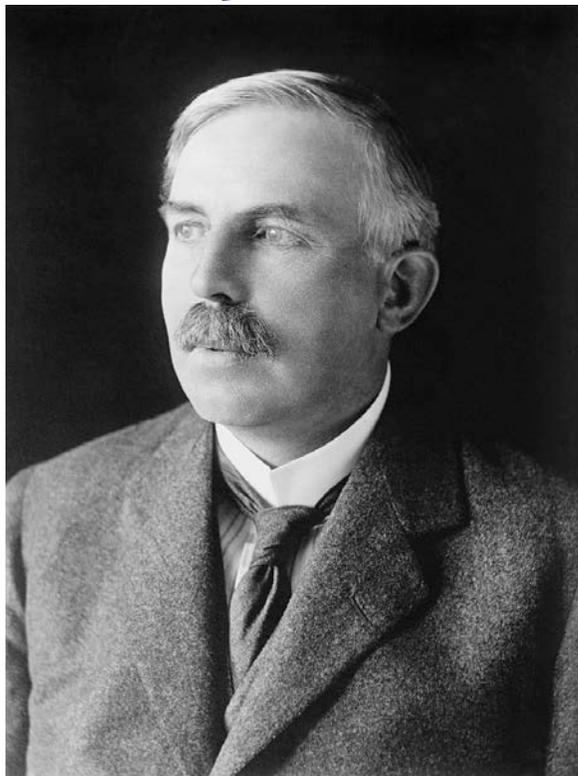
所以小球携带的电荷减少，悬丝仍提供之前的扭力，两球彼此靠近。

库仑扭称漏电的原因被归结为空气会自发电离。

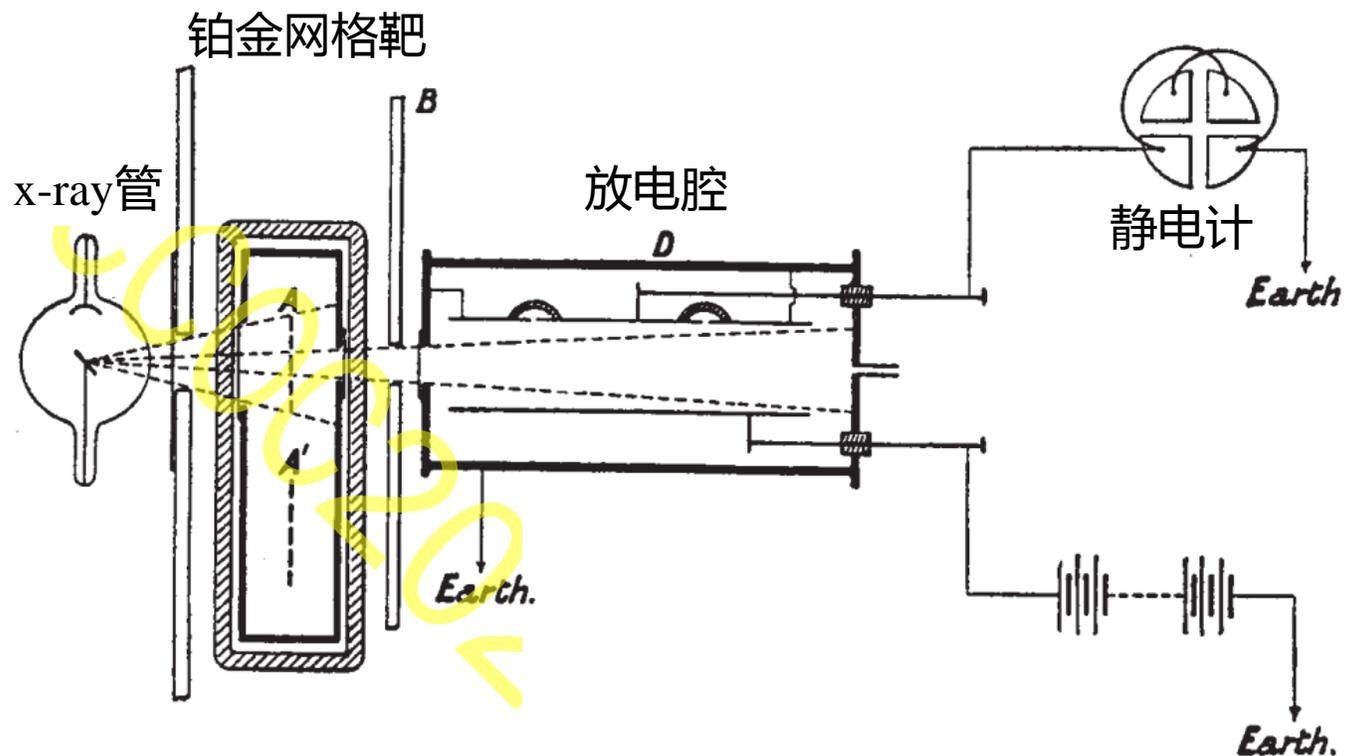
COO2021

那么，空气为什么会自发电离？

空气自发电离是辐射导致，但是辐射源在哪？



卢瑟福(Ernest Rutherford, 1871-1937,英国)  
提出原子核模型



从1901年开始，卢瑟福与合作者R. McClung开始设计实验  
测量气体的电离能。

1903年卢瑟福发现暴露于X-ray的空气会电离。因此他认为  
空气自发电离也是辐射导致。

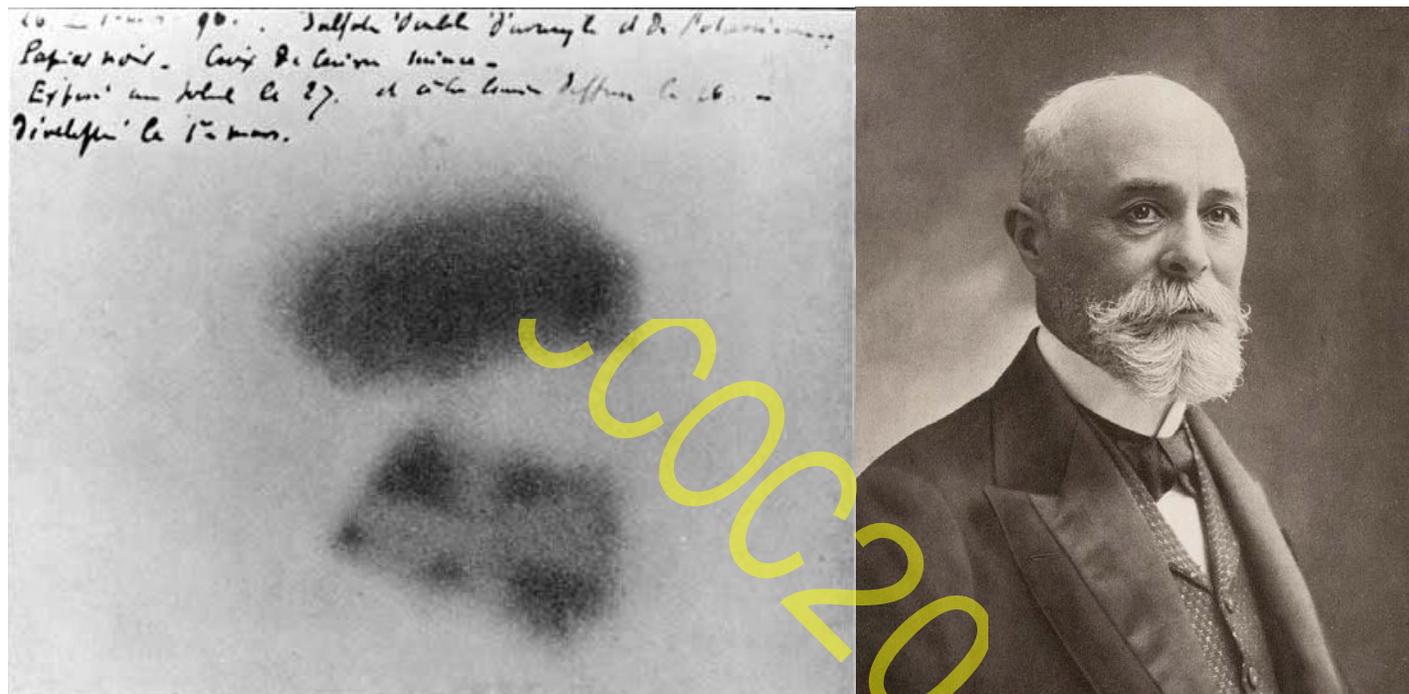
电离辐射可以让空气发生电离

20220707



那么，让空气自发电离的辐射源来自哪里？

## 19和20世纪之交的人们对辐射和放射性还并不了解



我因为1896年发现了天然放射性，获得了1903年的Nobel Prize

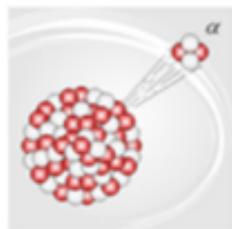
贝克勒尔(A. H. Becquerel, 1852-1908, 法国)与他发现放射性的底片  
贝克勒尔同时是居里夫人的博士生导师

天然放射性最早是在矿物铀盐发现的，当时人们也相信放射性是来自于地表和地下的矿物

人们认为让空气电离的辐射是那种穿透性极强的，当时发现穿透性最强的射线就是电中性的 $\gamma$ 射线。当时人们普遍称让空气电离的辐射其为**穿透辐射** “penetration radiation”

# 放射性和电离辐射

## 放射性衰变



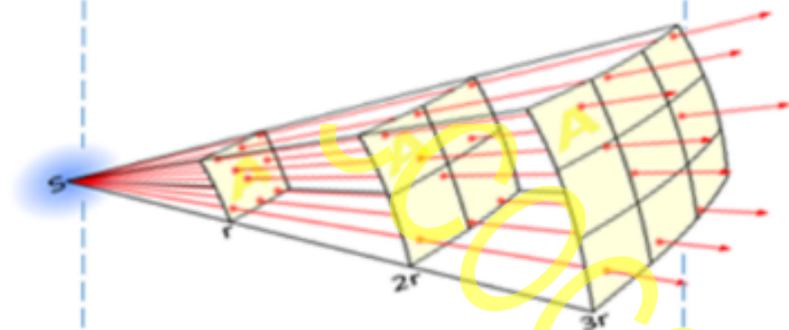
测量量:

- 贝可勒尔, 简称贝克 (becquerel, Bq)

贝可勒尔是放射活度的国际标准单位。

1贝可勒尔=衰变1次/每秒

## 电离辐射



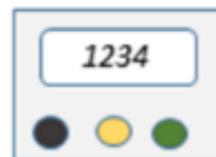
传播效应:

- 与距离平方反比
- 与物质作用会散射
- 也会被物质吸收

从一点出发的电离辐射强度会随着传播距离的平方衰减, 如果电离辐射穿过物质也会被物质吸收和散射。

## 探测

探测设备



远离辐射源, 受到的电离辐射越少, 空气的电离速率更低! 只要测出空气电离速率的变化, 就可以找出辐射源在哪!

测量量:

辐射剂量

- 戈瑞(Gray, Gy)
- 希沃特(Sievert, Sv)

粒子计数

- 个/每秒(Count per second, cps)
- 个/每分(Count per minute, cpm)

辐射剂量和粒子计数这两种描述方式都有使用, 这取决于使用的领域和辐射类型。在物理领域上使用戈瑞作计量单位; 在生物领域希沃特使用剂量单位。

$$F \propto \frac{A}{r^2}$$



离辐射源越近，辐射强度越大，空气电离速率越快

20220707

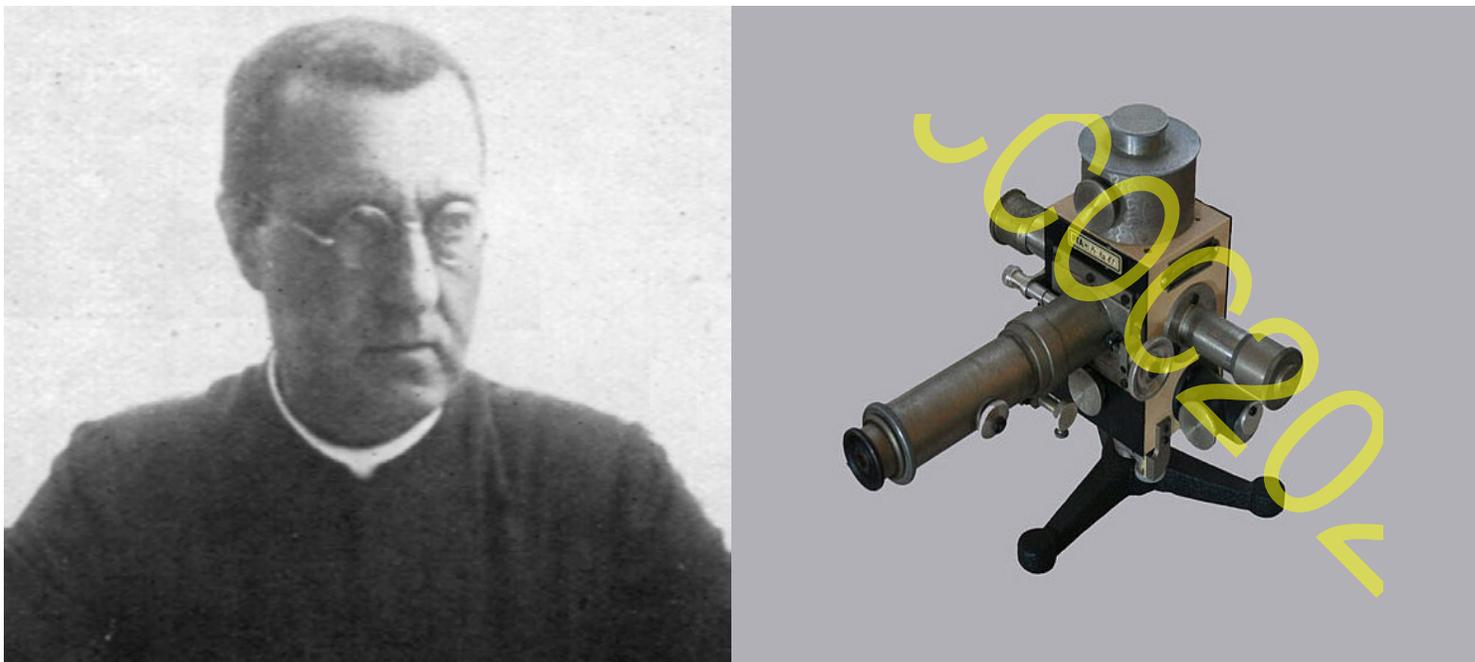


陆地有天然放射性矿物，这可能是空气电离的原因

思考：如何实验证明来自陆地的放射性导致了空气电离

# 验证“穿透辐射”来自于地面

- 世界各地的空气电离速率应该相差不大
- 远离陆地时空气电离速率应该迅速减小



沃尔夫(Theodor Wulf, 1868-1946, 法国)本职是天主教神父, 他改进了静电器, 并用于测量空气电离速率.

测量了德国, 荷兰, 比利时各地的空气电离速率。结果与他所假设的让空气电离的辐射来自于地表表层的放射性物质一致。

他开始进一步去验证这个假设, 如果放射性来自于地表, 那么空气电离速率会随着高度的升高而降低。



支持穿透辐射来自地底！



在1910年，沃尔夫比较埃菲尔铁塔塔顶塔顶和地面两种情况下的电离强度的实验。

他发现电离现象随着高度增加变弱，在塔顶的辐射大约是地面的64%。

但是减弱的比例低于他的理论预期，没有确证他的假说。

其实建造埃菲尔铁塔采用的钢铁中含有放射性。



埃菲尔铁塔(高324m)



帕西尼(Domenico Pacini, 1878-1934, 意大利), 他用和沃尔夫类似设计的探测器在测量空气电离速率(摄于1910年10月20号)

帕西尼在陆地上、海上和热那亚海湾 (Golfo di Genova) 的水下用静电器做电离速率的测量。



热那亚海湾(Golfo di Genova)

大气中还存在着一种与地壳中的放射性物质无关的穿透辐射！



离利沃诺(Livorno)岸边 300 m 的一艘船上的通过电离速率测算处的放射性只降低了30%。

地面的放射性对空气电离只贡献了一部分！

与水面相比，水下 3 米处的辐射量减少了 20%。

水体又屏蔽了一部分辐射，而这一部分辐射来自于大气中！

发现来自地面的“穿透辐射”对空气电离的贡献  
只占很小一部分



那么，导致空气电离的辐射是否来自于天上？

思考：如何实验证明是来自天上的辐射导致了空气电离



为了测量远离地球表面的电离辐射强度，一些研究人员在 20 世纪头十年乘坐气球飞行，进行高空的电离速率测量。

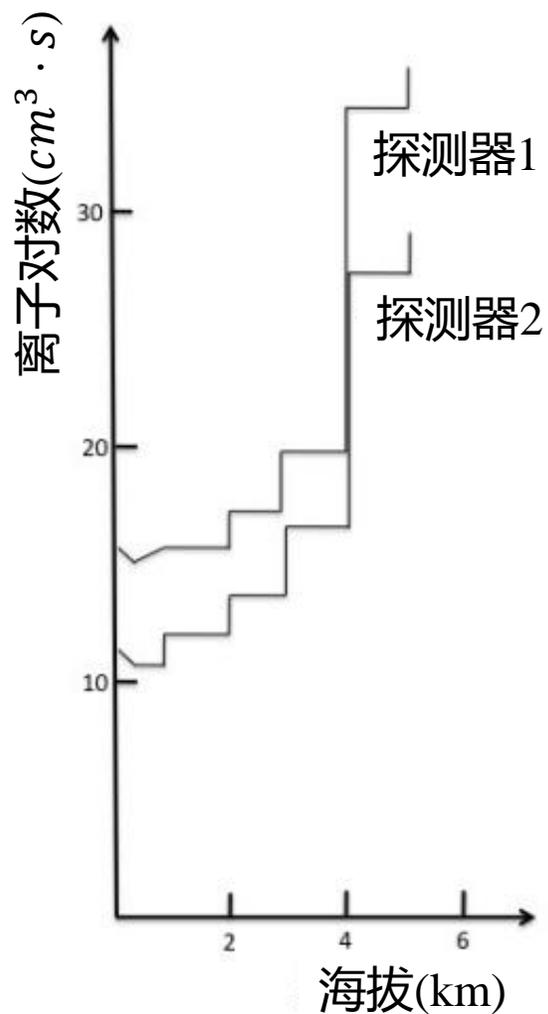
其中一位先驱 阿尔伯特(Albert Gockel,瑞士)测量了高达 3000 米的空气电离辐射水平。

他得出结论，电离不会随着高度的增加而减少，因此不可能有纯粹的地球起源。

在1911至1913年期间，赫斯带着验电器一共飞行了10次，其中最高达到了5300m！



赫斯(Victor F. Hess, 1883-1964, 奥地利)与他在气球实验中的照片(在气球里面的是赫斯)



随着海拔的上升，电离速率先缓缓的减少。

随后在海拔5300米处，发现电离速率增加到海平面的三倍左右。

三年做了10次气球飞行实验，证明了让空气电离的辐射源主要来自于宇宙。



薛定谔后来的计算表明，放射性部分来自天上，部分来自地壳，地壳放射性的减少可以被来自高达 3000 米的外星来源的放射性增长所抵消。

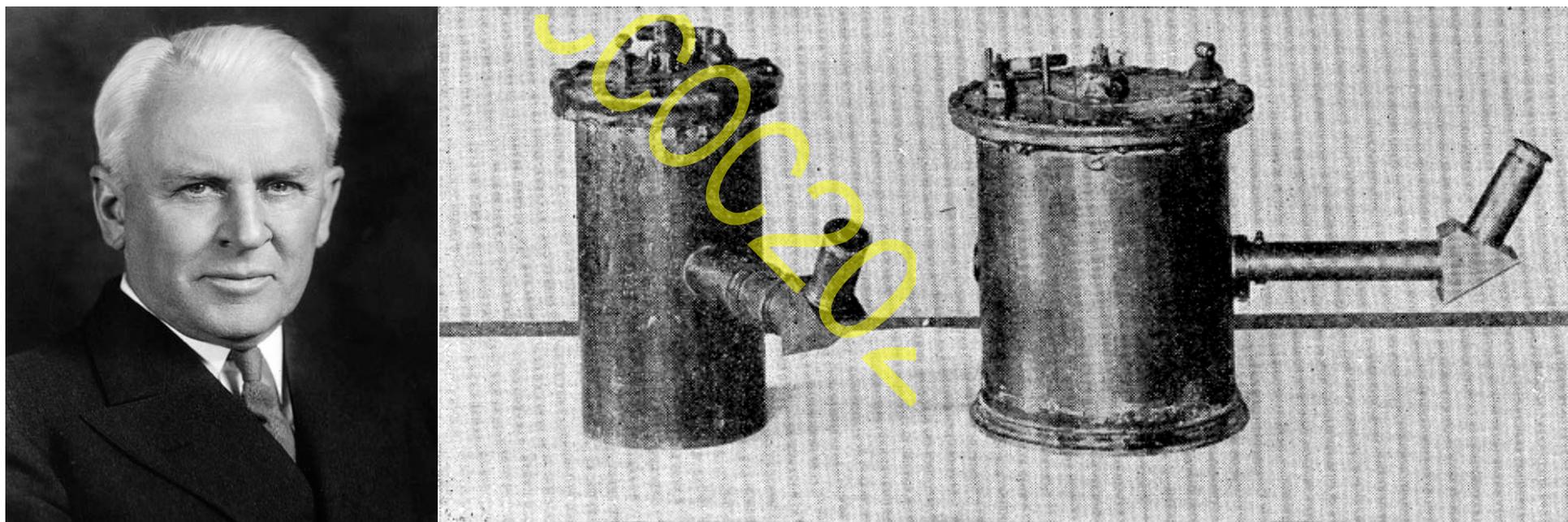
空气电离辐射来自于天上

但科学和真理总要经得起质疑和考验



## 给出电子电荷量的密里根最开始怀疑赫斯的实验结果

密立根把探测器放在无人操作的气球上，在1500米的高空测到的辐射强度不到赫斯测量结果的四分之一。随后的实验结果和分析实验细节表明，辐射量的差异是因为美国德州和中欧的地磁场差异引起的。

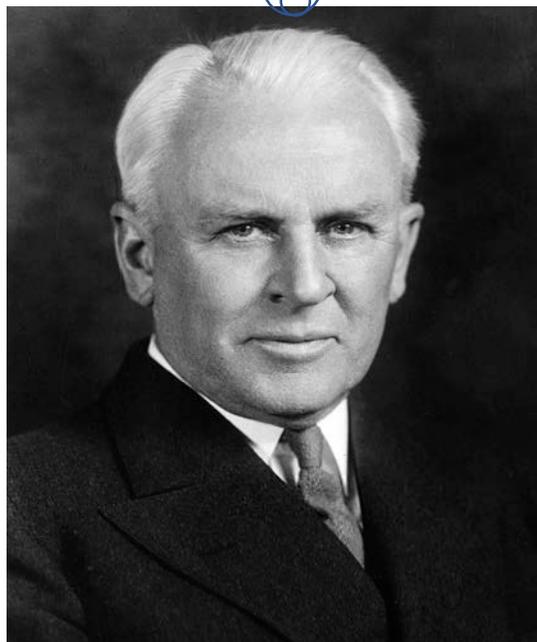


密立根(Robert A. Millikan, 1868-1953, 美国)和他用于测量电离速率的静电器

2米水深对辐射的吸收作用与近1800m的空气相当。

最后证据表明该辐射来自于天上。

做科学嘛，最重要的是开心严谨



1926年，密立根在加利福尼亚州群山中的缪尔湖（Muir Lake，海拔3392m）和慈菇湖（Arrowhead Lake，海拔1577m）中做实验，把探测器放置于水下测量电离速率。

通过比较电离速率与湖水深度的关系发现，同样水深的情况下，探测器在缪尔湖测得的电离速率会快于慈菇湖，只有将缪尔湖的探测器再往深处下放2m，两者的电离速率才接近。

2m深度的水对辐射的屏蔽作用和1800m厚度的大气对辐射的屏蔽作用相当。用距离(长度)单位来描述对辐射的屏蔽和吸收作用并不贴切。

相互作用深度(*Interaction Depth, X*)

$$X = \rho \cdot r$$

海平面大气密度 $0.00125\text{g/cm}^3$

水的密度 $1\text{g/cm}^3$

1m深的水和800m厚的海平面大气对辐射有相同的屏蔽作用！

密立根在他的一篇论文中创造了“宇宙射线” (cosmic ray) 一词，并认为宇宙射线是银河系中“原子诞生的初啼” (birth cries of atoms)。

# 从宇宙线中发现新粒子

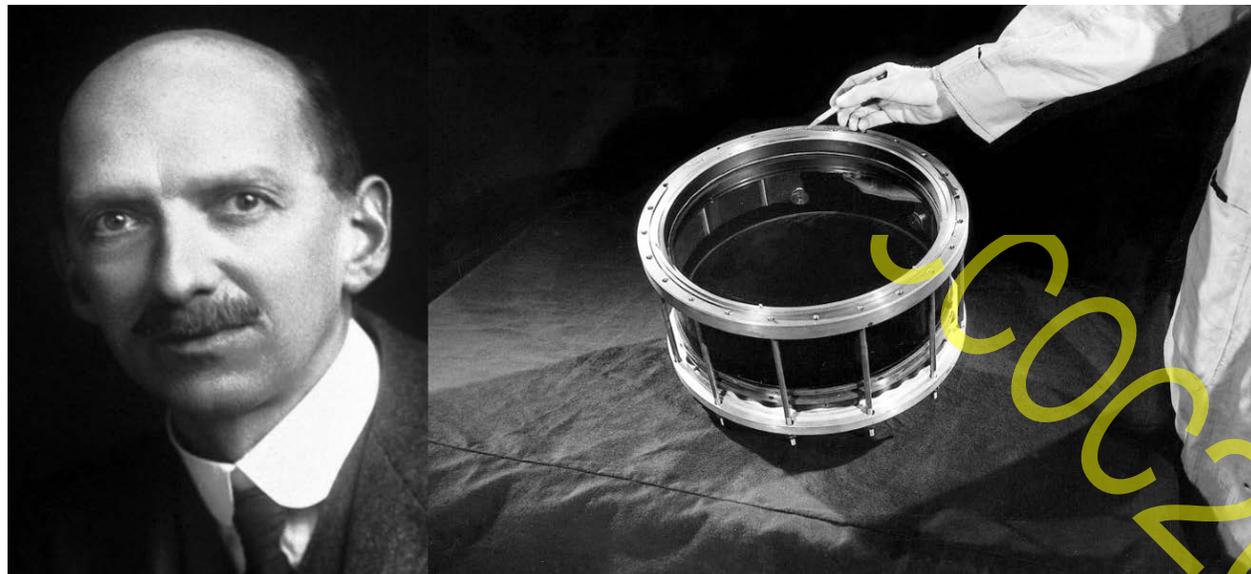
和

## 以前的人们怎么探测宇宙线的？



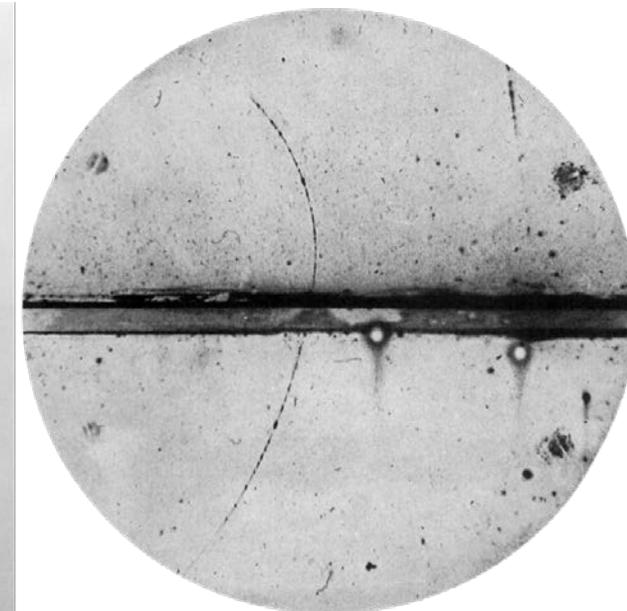
完成选修3.5.5教学，供阅读

# 在云室中发现正电子



威尔逊(Charles Thomson Rees Wilson, 1869-1959, 英国)和他设计的云室

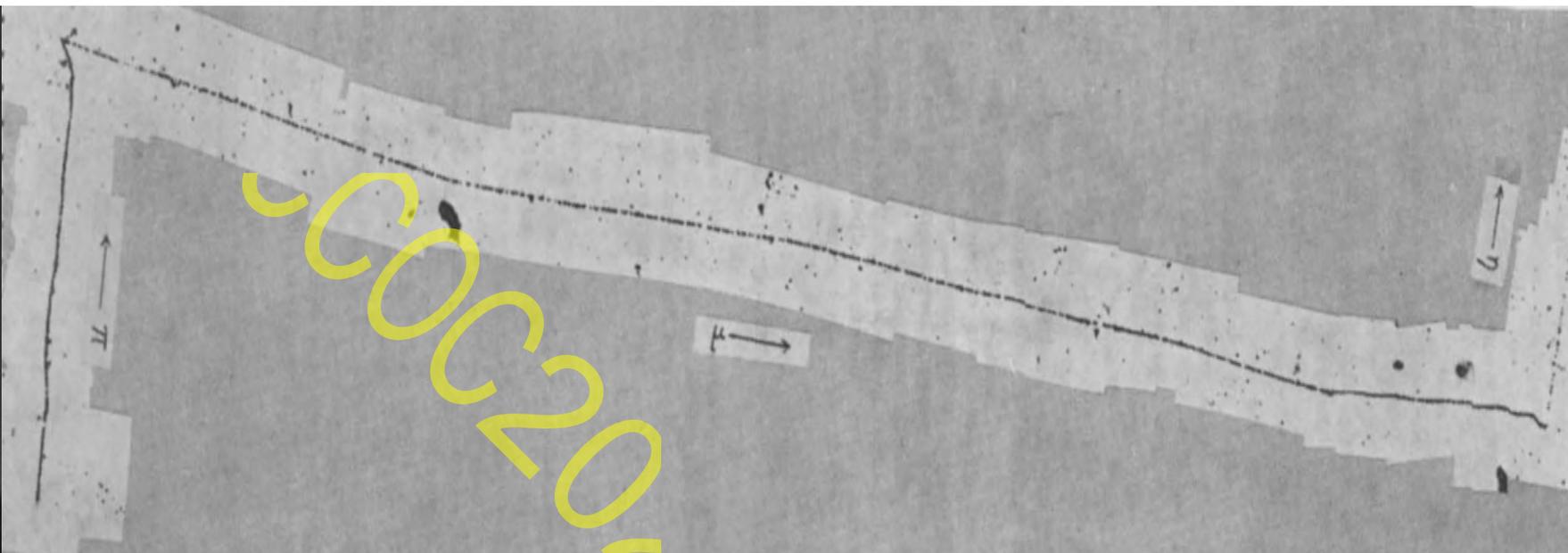
1894年，威尔逊在云雾缭绕的英国尼维斯峰(Ben Nevis)上通过对云雾现象的研究产生了捕捉围观带电粒子的灵感。



安德森(Carl David Anderson, 1905-1991)和他在云室中发现的正电子轨迹照片。

1932年在云室中发现正电子从下往上穿过铅板，发生了减速，所以在磁场下旋转半径减小。

# 在核乳胶中发现介子



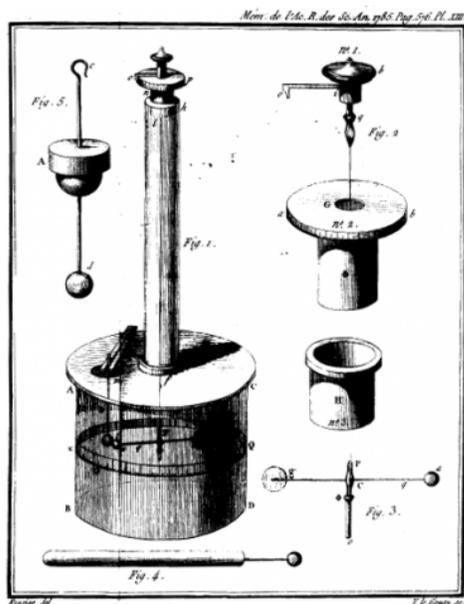
鲍威尔(Cecil Frank Powell,1903-1969)与其合作者改进了贝可勒尔的乳胶片的灵敏度并增加了厚度并用于检测宇宙线粒子。

利用核乳胶成像的方式，人们在宇宙线中发现了介子

$\pi^- \rightarrow \mu^- \rightarrow e^-$  衰变过程的核乳胶照片，发生路径近90°偏转，因为衰变产生的中微子带走了一部分动量

在那股如洪流般喷涌的新发现大潮中，宇宙线毫无疑问是产生新奇现象的源头。  
为人类带来了来自宇宙的宝贵馈赠和永不耗竭的惊喜！

从简单的验电器、静电计到云雾室、核乳胶技术的广泛使用，人类在性能不断提升的探测器协助下揭开  
现代粒子物理大幕的一角。



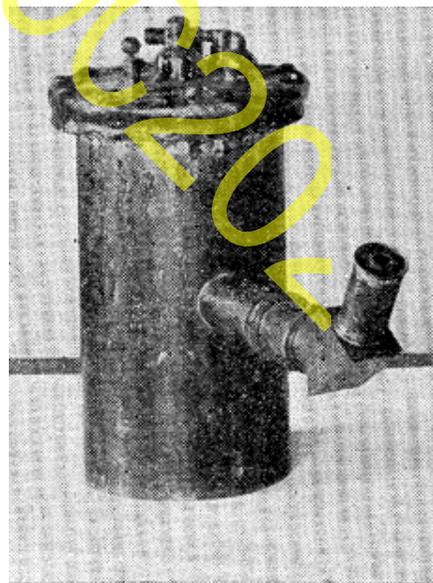
验电器

7/25/2022

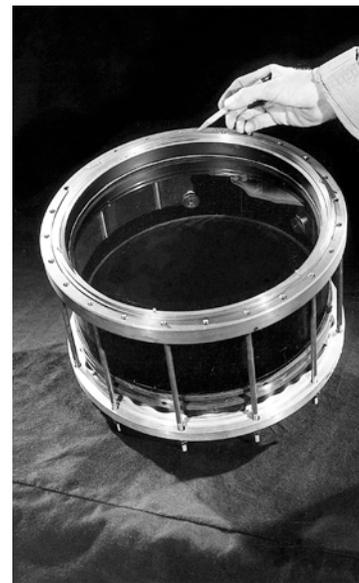


静电计

xiongzhen@ihep.ac.cn



云雾室



核乳胶

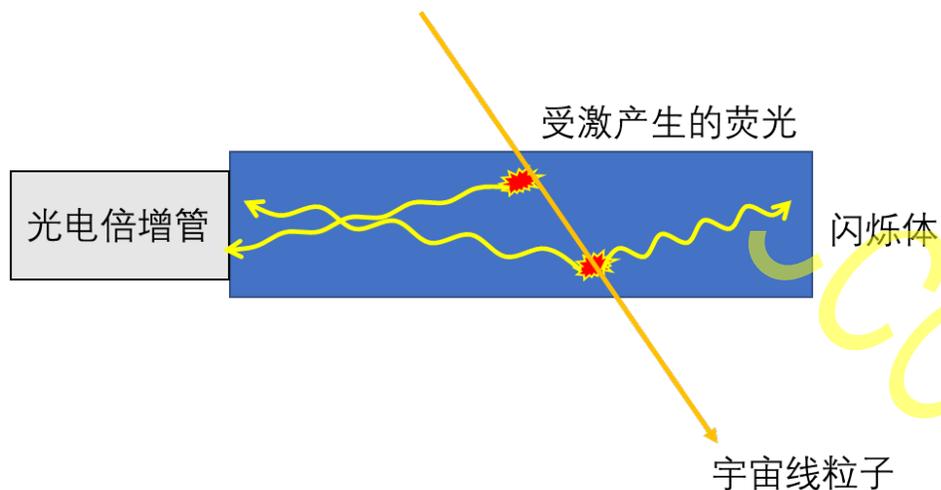
27



现在，我们该如何利用性能更好的探测器去测量宇宙线呢？

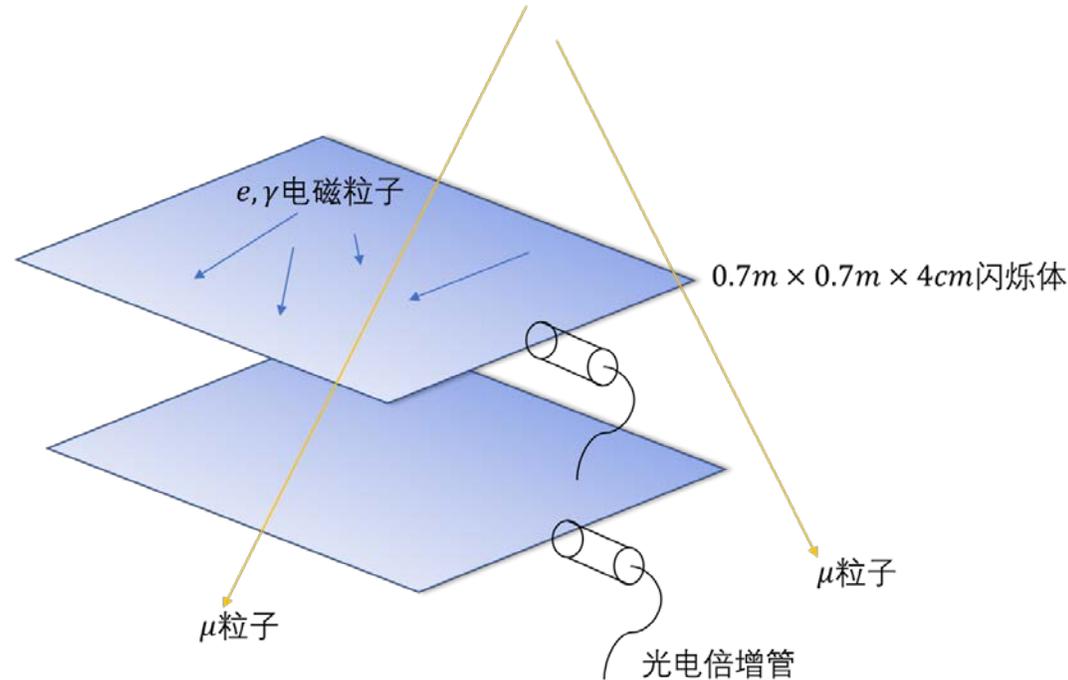


# 现代宇宙线探测器的一种——闪烁体探测器的工作原理



## 闪烁探测器工作原理

当宇宙线带电粒子进入塑料闪烁体时，会将自己的一部分能量沉积在塑料闪烁体中，塑料闪烁体的原子或分子受激而产生荧光，这些光被光电倍增管收集，经光电效应转换为电子，然后进行千万倍放大。读取电信号可以得知有宇宙线粒子穿过了闪烁体。

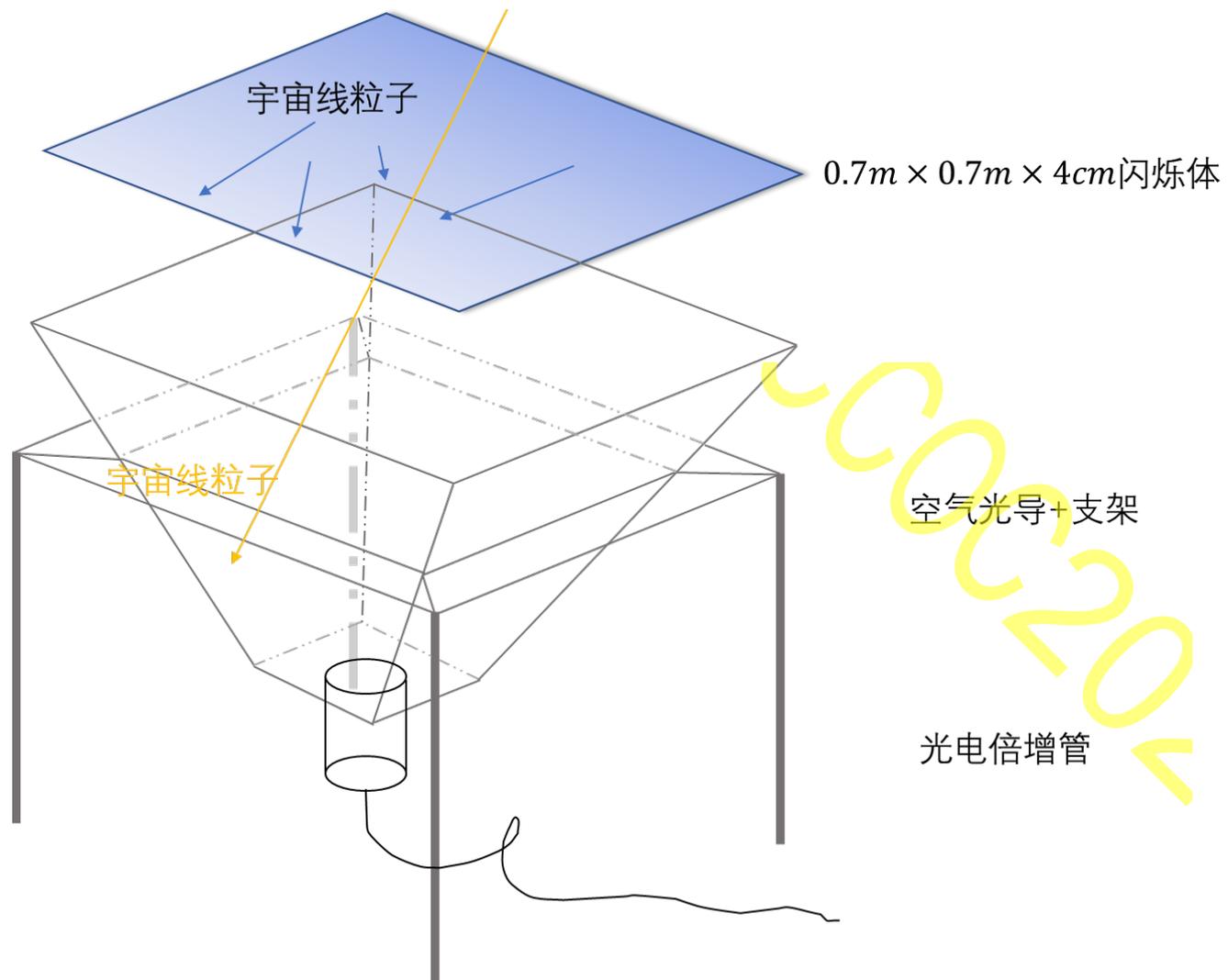


CCOC制作出了两种宇宙线探测器供大家使用！

探测器可以记录时间和电荷信息！

探测器本质上是用来数宇宙线粒子个数！多层闪烁体探测器符合可以选出特定路径的宇宙线粒子。

第一种探测器，单个探测器，可以由多个组成整列！

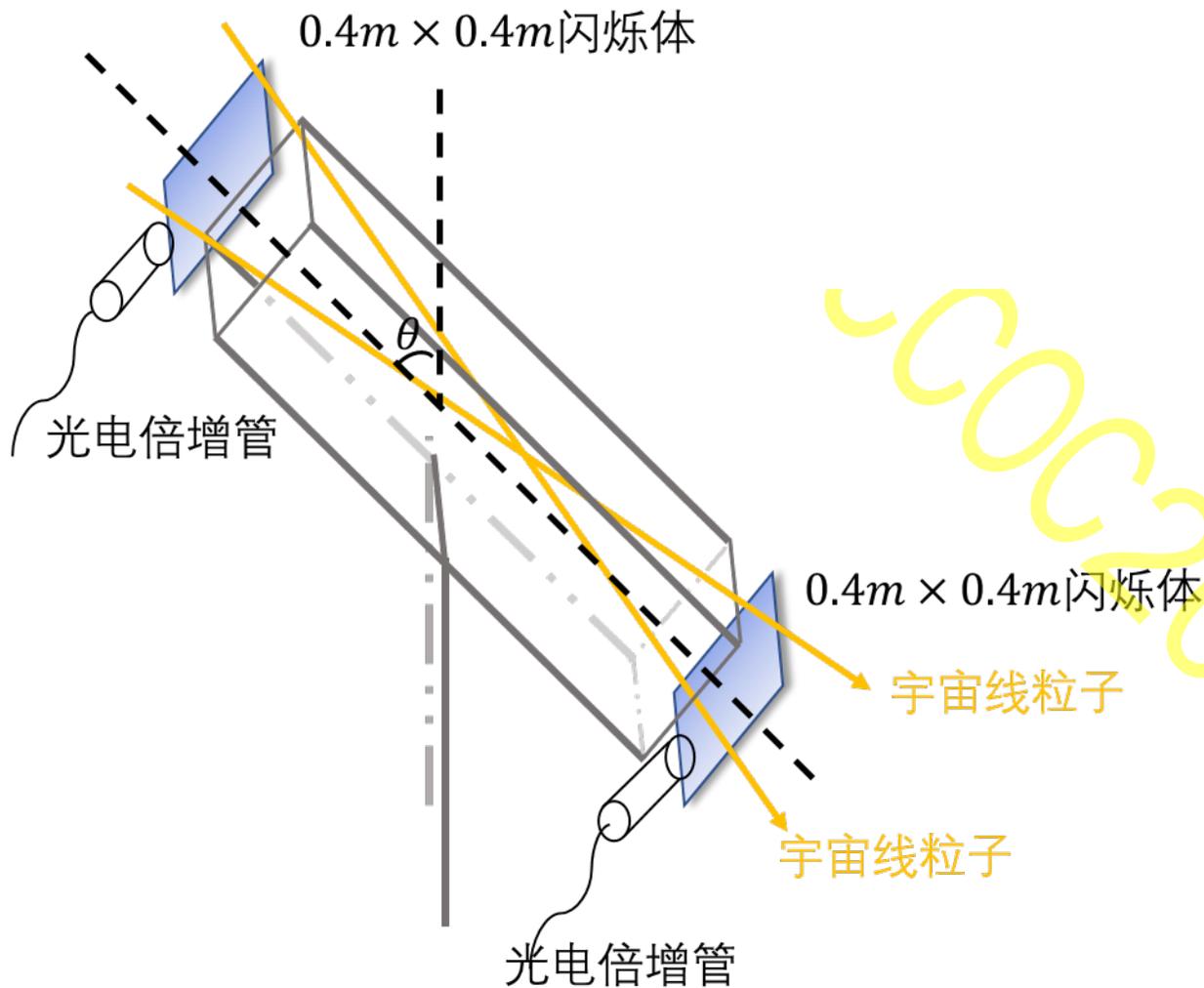


空气光导探测器



## 第二种探测器，望远镜系统！

思考：要重新证明前人的结论，大家该如何设计这些实验呢？



宇宙线望远镜系统

当时科学家的实验思路：

空气电离速率  $\longrightarrow$  放射源距离

- 测量不同地方的空气电离速率
- 测量远离陆地的空气电离速率
- 测量不同海拔的空气电离速率

顺便得出了物质对辐射的吸收和屏蔽作用

我们的实验思路：

宇宙线触发探测器的计数率

- 测量不同地方的探测器的计数率
- 测量宇宙线的运动方向

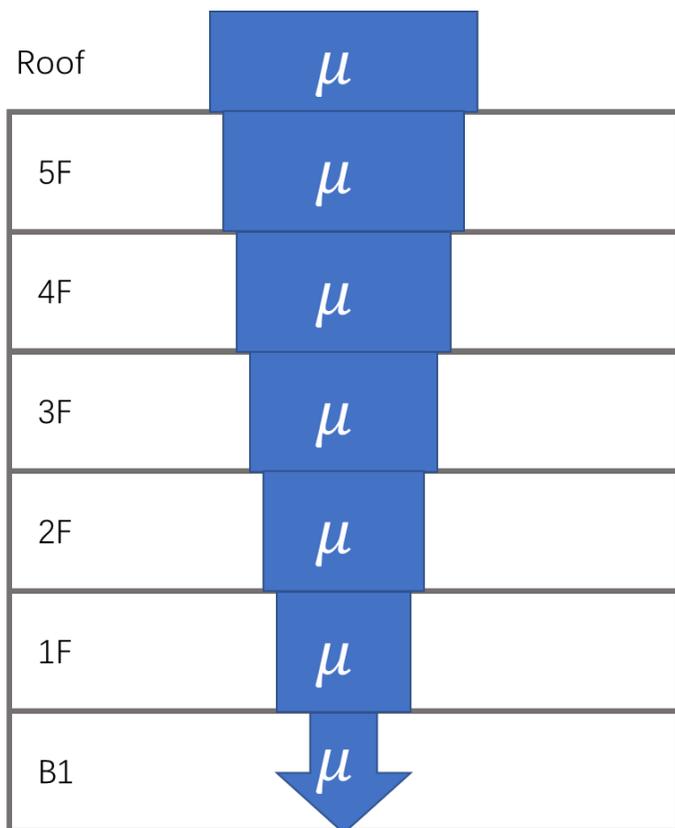
物质的遮挡效应对宇宙线计数率的影响

方式类似

但是我们探测器性能更好

## 证明宇宙线来自于天上:

缪子( $\mu$ )是宇宙线中含量相当丰富的粒子, 速度近乎是真空中光速, 而且穿透性极强。缪子是一种基本粒子, 除了质量远大于 $e$ , 其余性质几乎和 $e$ 相同。



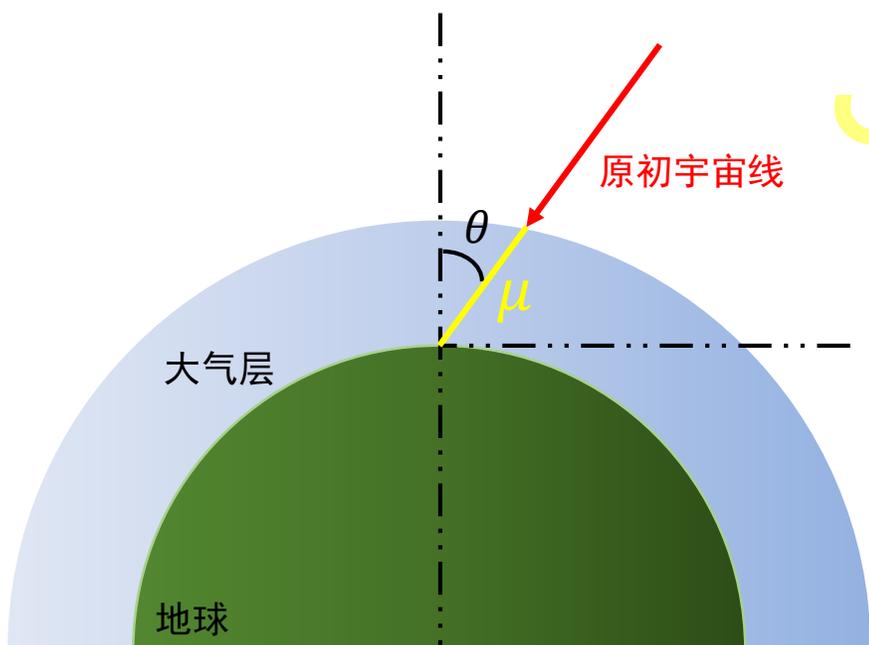
测量每层楼的 $\mu$ 粒子计数

计算每层楼的 $\mu$ 粒子频数

$\mu$ 粒子频数随遮挡楼层的变化

我们可以将探测器放置在校舍的不同楼层, 统计单位时间内每层楼的缪子计数, 进而计算每层楼的缪子频数。我们比较不同层数的缪子频数, 就会发现缪子频数会随着天花板累计厚度的增加而减少, 说明缪子确实是来自于天上。

证明宇宙线受到大气的遮挡效应:



密里根发现大气和水一样对宇宙线有阻挡效应。大气看似比固体稀薄，但是厚厚的大气层对宇宙线仍然有很强的吸收和散射，从不同天顶角看起来，大气的厚度就完全不一样。

宇宙线各向同性地进入地球大气，于地球大气作用产生我们所探测到的缪子，缪子从天上各个方向几乎都是均匀，但由于入射角度不一样，它们穿过的大气厚度不一样，受到的阻挡效应便不同。

理论上Rate  $\propto (\cos\theta)^2$

# 时间线

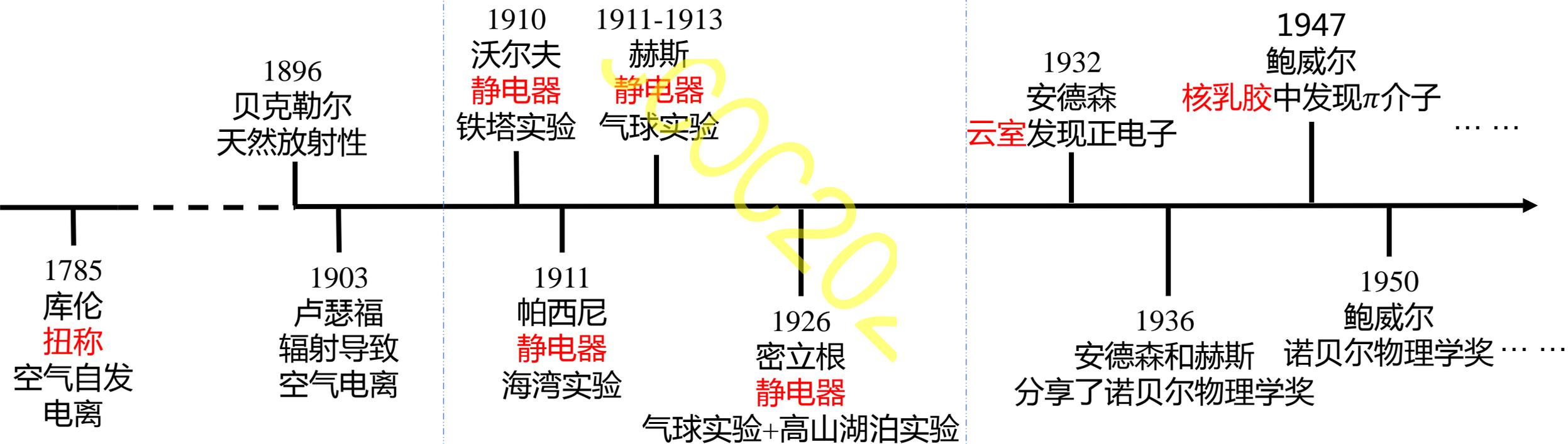
确认空气电离来自于辐射

花了120年，4~5代人的探索

确认辐射来源来自于宇宙

花费了20年，一代人的探索

从宇宙线中发现新的粒子



在宇宙线研究的历史里，乃至在科学研究的历史里，从不乏为了科学而冒险的浪漫故事。



2012年8月7日赫斯的两个孙子在一块纪念碑前合影。这个纪念碑位于柏林附近的皮埃斯科夫(Pieskow)，上面写着：“纪念宇宙射线的发现”。正是一百年前奥地利物理学家赫斯乘坐氢气球在皮埃斯科夫附近着陆。

对于自然的探索，无论过去多少年，总有人常怀冒险和浪漫之心，去忘我探索！  
希望老师和同学们可以在这个校园宇宙线观测暑期学校里感受到我们的热情！

## 教学目标：

- 了解空气电离过程；
- 了解放射性的概念；
- 了解源的强度与距离的关系；
- 了解作用深度的概念。

## 教学难点：

- 理解宇宙线的存在；
- 了解宇宙线的发现是源于看似毫不相关的扭称漏电现象；
- 了解科学探究的历史其实是由背后技术发展作为支撑的；
- 了解人们受限于当时的不成熟认知，对自然的认识是逐步形成的；
- 了解科学探究是经得起质疑和考验的；
- 了解无论什么时代，实验思路是可类比的。



谢谢

欢迎各位老师同学  
提问和讨论

---

CC0C201



课后问题：

1.  $\mu$ 衰变产物之一是什么？ ☆

- A. 电子
- B. 质子
- C. 中子
- D. 核子

2. 以前的人是通过什么原理确认能让空气电离的辐射源位置的？

3. 谁确认了让空气电离的辐射来自地球之外？他做了什么实验去证明？

4. 谁给这种射线命名为“宇宙射线”？他做了哪些实验？又验证了什么结论？

5. 因为对“宇宙射线”的研究而分享1936年诺贝尔物理学奖的科学家，各是因为什么贡献而获奖？